I. Introducción

Sistemas por doquier

Si alguien se pusiera a analizar las nociones y muletillas de moda hoy por hoy, en la lista aparecería «sistemas» entre los primeros lugares. El concepto ha invadido todos los campos de la ciencia y penetrado en el pensamiento y el habla populares y en los medios de comunicación de masas. El razonamiento en términos de sistemas desempeña un papel dominante en muy variados campos, desde las empresas industriales y los armamentos hasta temas reservados a la ciencia pura. Se le dedican innumerables publicaciones, conferencias, simposios y cursos. En años recientes han aparecido profesiones y ocupaciones, desconocidas hasta hace nada, que llevan nombres como proyecto de sistemas, análisis de sistemas, ingeniería de sistemas y así por el estilo. Constituyen el meollo de una tecnología y una tecnocracia nuevas; quienes las ejercen son los «nuevos utopistas» de nuestro tiempo (Boguslaw, 1965), quienes —en contraste con la cepa clásica, cuyas ideas no salían de entre las cubiertas de los libros— están creando un mundo nuevo, feliz o no.

Las raíces de este proceso son complejas. Por un lado está el tránsito desde la ingeniería energética —la liberación de grandes cantidades de energía, así en las máquinas de vapor o eléctricas— hasta la ingeniería de control, que dirige procesos mediante artefactos de baja energía y que ha conducido a las computadoras y la automación. Han aparecido máquinas que se autocontrolan, del humilde termostato doméstico a los proyectiles autoguiados de la Segunda Guerra Mundial, y de ahí a los proyectiles inmensamente

perfeccionados de hoy. La tecnología ha acabado pensando no ya en términos de máquinas sueltas sino de «sistemas». Una máquina de vapor, un automóvil o un receptor de radio caían dentro de la competencia del ingeniero adiestrado en la respectiva especialidad. Pero cuando se trata de proyectiles o de vehículos espaciales, hay que armarlos usando componentes que proceden de tecnologías heterogéneas: mecánica, electrónica, química, etc.; empiezan a intervenir relaciones entre hombre y máquina, y salen al paso innumerables problemas financieros, económicos, sociales y políticos. O bien el tráfico aéreo, o incluso automóvil, no es sólo cosa del número de vehículos en funcionamiento sino que son sistemas que hay que planear o disponer. Así vienen surgiendo innumerables problemas en la producción, el comercio y los armamentos.

Se hizo necesario, pues, un «enfoque de sistemas». Dado un determinado objetivo, encontrar caminos o medios para alcanzarlo requiere que el especialista en sistemas (o el equipo de especialistas) considere soluciones posibles y elija las que prometen optimización, con máxima eficiencia y mínimo costo en una red de interacciones tremendamente compleja. Esto requiere técnicas complicadas y computadoras para resolver problemas que van muchísimo más allá de los alcances de un matemático. Tanto el *hardware* («quincalla» se ha dicho en español) de las computadoras, la automación y la cibernación, como el *software* de la ciencia de los sistemas, representan una nueva tecnología que ha sido llamada Segunda Revolución Industrial y sólo lleva unas décadas desenvolviéndose.

Esta situación no se ha limitado al complejo industrial-militar. Los políticos suelen pedir que se aplique el «enfoque de sistemas» a problemas apremiantes, tales como la contaminación del aire y el agua, la congestión de tráfico, la plaga urbana, la delincuencia juvenil y el crimen organizado, la planeación de ciudades (Wolfe, 1967), etc., y hablan de este «nuevo concepto revolucionario» (Carter, 1966; Boffey, 1967). Un primer ministro canadiense (Manning, 1967) inserta el enfoque de sistemas en su plataforma política:

> ...existe una interrelación entre todos los elementos y constituyentes de la sociedad. Los factores esenciales en los problemas, puntos, políticas y programas públicos deben ser siempre considerados y evaluados como componentes interdependientes de un sistema total.

Semejante evolución no pasaría de ser otra de las numerosas facetas de cambio en nuestra sociedad tecnológica contemporánea,

www.esnips.com/web/Scientia

si no fuera por un factor significativo fácil de ser pasado por alto en las técnicas tan sutiles y forzosamente especializadas de la ciencia de la computación, la ingeniería de sistemas y campos afines. No sólo está la tendencia, en la tecnología, a hacer cosas mayores y mejores (o, si no, más provechosas, destructivas, o todo a la vez), sino que hay un cambio en las categorías básicas del pensamiento, del cual las complejidades de la tecnología moderna no pasan de ser una manifestación, acaso ni la más importante. De uno u otro modo estamos forzados a vérnoslas con complejidades, con «totalidades» o «sistemas», en todos los campos del conocimiento. Esto implica una fundamental reorientación del pensamiento científico.

No sería factible tratar de resumir la repercusión de los «sistemas», lo cual, por lo demás, dejaría fuera las consideraciones de este libro. Tendrán que bastar unos cuantos ejemplos, elegidos más o menos arbitrariamente, a fin de bosquejar la naturaleza del problema y la consiguiente reorientación. El lector dispensará el toque egocéntrico en las citas, ya que el propósito del libro es presentar el punto de vista del autor y no reseñar el campo con neutralidad.

Es bien sabido que en física se han dado enormes pasos en las últimas décadas, lo cual ha generado también problemas nuevos —o quizás un nuevo tipo de problema—, tal vez más evidentes para el lego en el número indefinido —van centenares— de partículas elementales, de la que la física al presente puede dar poca razón. Según un experto destacado (De-Shalit, 1966), el ulterior progreso de la física nuclear «requiere mucha labor experimental, así como el surgimiento de más métodos poderosos para manejar sistemas de partículas numerosas, pero no infinitas». A. Szent-Györgyi (1964), el gran fisiólogo, expresó con humor la misma ambición:

> [Cuando me agregué al Institute for Advanced Study of Princeton] lo hice con la esperanza de que codeándome con aquellos grandes físicos atómicos y matemáticos aprendería algo acerca de las cosas vivas. Pero en cuanto revelé que en cualquier sistema vivo hay más de dos electrones, los físicos no quisieron oír más. Con todas sus computadoras, no podían decir qué haría el tercer electrón. Lo notable es que éste lo sabe exactamente, así que el pequeño electrón sabe algo que ignoran todos

www.esnips.com/web/Scientia

los sabios de Princeton, por lo cual tiene que ser algo muy sencillo.

Y Bernal (1957) formuló de este modo el problema aún no resuelto:

> Nadie que conozca las dificultades de ahora se figura que la crisis de la física seguramente se resuelva merced a algún simple truco o modificación de las teorías existentes. Es preciso algo radical, que habrá de llegar mucho más allá de la física. Está siendo forjada una nueva visión del mundo, pero serán precisas mucha experiencia y mucha controversia antes de que adquiera forma definitiva. Tendrá que ser coherente, que incluir y esclarecer el nuevo conocimiento de las partículas fundamentales y sus complejos campos, que resolver la paradoja de la onda y la partícula, deberá hacer igualmente inteligibles el mundo interior del átomo y los vastos espacios del universo. Deberá tener una dimensión distinta de todas las visiones del mundo previas, e incluir una explicación del desarrollo y el origen de cosas nuevas. Con ello se acoplará naturalmente a las tendencias convergentes de las ciencias biológicas y sociales, donde una pauta regular se trenza con su historia evolutiva.

El triunfo de la biología molecular en años recientes, el «desciframiento» del código (o clave) genético, y los consiguientes logros en genética, evolución, medicina, fisiología celular y muchos otros campos, es ya lugar común. Pero a pesar del discernimiento ahondado que alcanza la biología «molecular» —o acaso en virtud de él—, es manifiesta la necesidad de una biología «organísmica», según el presente autor lo llevaba sosteniendo unos 40 años. La biología no sólo tiene que ocuparse del nivel fisicoquímico o molecular, sino de los niveles superiores de organización viva también. Tal como discutiremos más adelante (p. 10), esta exigencia se ha planteado con renovado vigor, en vista de recientes hechos y conocimientos, pero difícilmente se habrá agregado un argumento que no hubiera sido discutido antes (von Bertalanffy, 1928a, 1932, 1949a, 1960).

Por otro lado, en psicología la concepción básica solía ser el «modelo robot». Había que explicar la conducta con el esquema mecanicista estímulo-respuesta (E-R); el condicionamiento, acorde con la pauta del experimento con animales, aparecía como funda-

www.esnips.com/web/Scientia

mento de la conducta humana; tenía que reemplazarse el «significado» por la respuesta condicionada, que negarse la especificidad del comportamiento humano, etc. La psicología de la *Gestalt* fue la primera en enfrentarse al esquema mecanicista hace cosa de medio siglo. Más recientemente se han visto muchos intentos encaminados a una «imagen del hombre» más satisfactoria, y el concepto de sistema va ganando importancia (cap. VIII); Piaget, por ejemplo, «vinculó expresamente sus conceptos a la teoría general de los sistemas de Bertalanffy» (Hahn, 1967).

Quizás aun más que la psicología, la psiquiatría ha adoptado el punto de vista de los sistemas (p. ej. Menninger, 1963; von Bertalanffy, 1966; Grinker, 1967; Gray *et al.*, en prensa). Citemos a Grinker:

> De las teorías llamadas globales, la que primero enunció y definió Bertalanffy en 1947 con el nombre de «teoría general de los sistemas» ha prendido... Desde entonces ha afinado, modificado y aplicado sus conceptos, establecido una sociedad dedicada a la teoría general de los sistemas y publicado un *General Systems Yearbook*. Muchos científicos sociales pero sólo un puñado de psiquiatras estudiaban, entendían o aplicaban la teoría de los sistemas. De pronto, bajo la guía del doctor William Gray, de Boston, se alcanzó un umbral, la reunión anual 122 de la American Psychiatric Association dedicó dos sesiones, en 1966, a la discusión de esta teoría, y se dispuso que en adelante hubiera reuniones regulares de psiquiatras para desarrollar esta «teoría unificada del comportamiento humano». De existir la tercera revolución (después de la psicoanalítica y la conductista), reside en el desenvolvimiento de una teoría general (p. ix).

El informe de una reciente reunión (American Psychiatric Association, 1967) pinta un vívido cuadro:

> Cuando una sala para 1500 personas está atiborrada al punto de que hay cientos en pie durante una sesión matutina entera, el tema debe de interesar de veras al auditorio. Tal fue la situación en el simposio sobre el uso de una teoría general de los sistemas en psiquiatría, celebrado dentro de la reunión de la American Psychiatric Association en Detroit. (Damude, 1967.)

www.esnips.com/web/Scientia

Lo mismo pasa en las ciencias sociales. Del vasto espectro, la extendida confusión y las contradicciones de las teorías sociológicas contemporáneas (Sorokin, 1928, 1966) emerge una conclusión segura: que los fenómenos sociales deben ser considerados en términos de «sistemas» —por difícil y hoy en día fluctuante que sea la definición de entidades socioculturales.

> Hay un panorama científico revolucionario [derivado] del movimiento de investigación general de los sistemas, [con un] cúmulo de principios, ideas y ahondamientos que ya han establecido un grado superior de orden y de comprensión científicos en muchas áreas de la biología, la psicología y algunas ciencias físicas... La moderna investigación de los sistemas puede servir de base a un marco más adecuado para hacer justicia a las complejidades y propiedades dinámicas del sistema sociocultural. (Buckley, 1967.)

El curso de los acontecimientos en nuestros tiempos sugiere una concepción análoga en la historia, incluyendo la consideración de que, después de todo, la historia es sociología haciéndose, estudiada «longitudinalmente». Son las mismas entidades socioculturales las que la sociología investiga en su estado presente y la historia en su devenir.

En otros tiempos puede haber servido de consuelo echar la culpa de atrocidades y estupideces a malos reyes, pérfidos dictadores, la ignorancia, la superstición, las carencias materiales y cosas así. Por ello la historia era del estilo «quién-hizo-qué»: «idiográfica» es el término técnico. Así, la Guerra de los Treinta años fue consecuencia de la superstición religiosa y de las rivalidades de los príncipes alemanes; Napoleón puso a Europa de cabeza en virtud de su ambición desmedida; la Segunda Guerra Mundial se debió a la perversidad de Hitler y a la proclividad bélica de los alemanes.

Hemos perdido este bienestar intelectual. En condiciones de democracia, instrucción universal y abundancia general, aquellas excusas de las atrocidades humanas fracasan miserablemente. Al contemplar cómo se hace la historia contemporánea, resulta difícil adscribir su irracionalidad y bestialidad a individuos nada más (a menos que les otorguemos una capacidad sobrehumana —o subhumana— para la maldad y la estupidez). Más bien parecemos víctimas de «fuerzas históricas»; sea lo que fuere lo que esto quiera decir. Los acontecimientos parecen envolver algo más que

www.esnips.com/web/Scientia

las decisiones y acciones individuales, y estar determinados más bien por «sistemas» socioculturales, trátese de prejuicios, ideologías, grupos de presión, tendencias sociales, el crecimiento y la decadencia de civilizaciones y quién sabe cuánto más. Sabemos científica y precisamente cuáles van a ser los efectos de la contaminación, el despilfarro de los recursos naturales, la explosión demográfica, la carrera armamentista, etc. Cada día nos los repiten incontables críticos que esgrimen argumentos irrefutables. Pero ni los guías nacionales ni la sociedad en conjunto parecen en condiciones de hacer nada por remediarlo. Si no queremos una explicación teísta —*quem Deus perdere vult dementat*—, parecemos seguir alguna trágica necesidad histórica.

Aun apreciando la vaguedad de conceptos como el de civilización y las limitaciones de «grandes teorías» como las de Spengler y Toynbee, la cuestión de las regularidades o leyes en los sistemas socioculturales tiene sentido aunque esto no implique por fuerza la inevitabilidad histórica según Sir Isaiah Berlin. Un panorama histórico como el que McNeill intituló *The Rise of the West* (1963), subrayando desde el título su posición antispengleriana, no deja de ser, con todo, una exposición de sistemas históricos. Semejante concepción invade campos que se dirían aparte, de modo que la «escuela arqueológica 'de proceso'» se dice «surgida del armazón debido a Ludwig von Bertalanffy para el caso del embrión en desarrollo, en el cual los sistemas desencadenan el comportamiento en coyunturas críticas y, luego de hacerlo, no pueden retornar a su pauta de origen» (Flannery, 1967).

En tanto que la sociología (y presumiblemente la historia) trata de organizaciones informales, otro adelanto reciente es la teoría de las organizaciones formales, o sea de estructuras escrupulosamente instituidas, tales como el ejército, la burocracia, las empresas de negocios, etc. Esta teoría está «enmarcada en una filosofía que acepta la premisa de que el único modo significativo de estudiar la organización es estudiarla como sistema», y el análisis de sistemas trata de la «organización como sistema de variables mutuamente dependientes»; de ahí que «la moderna teoría de la organización conduzca casi inevitablemente a una discusión de la teoría general de los sistemas» (Scott, 1963). En palabras de alguien que practica la investigación operacional:

En las últimas décadas hemos asistido al surgimiento

www.esnips.com/web/Scientia

> del «sistema» como concepto clave en la investigación científica. Ni que decir tiene, desde hace siglos que se estudian sistemas, pero ha sido agregado algo nuevo... La tendencia a estudiar sistemas como entidades más que como conglomerados de partes es congruente con la tendencia de la ciencia contemporánea a no aislar ya fenómenos en contextos estrechamente confinados sino, al contrario, abrir interacciones para examinarlas y examinar segmentos de la naturaleza cada vez mayores. Bajo la bandera de *investigación de sistemas* (y sus abundantes sinónimos) hemos presenciado también la convergencia de muchos más adelantos científicos especializados contemporáneos... Esta indagación, como tantas otras, está imbricada en un esfuerzo cooperativo que abarca una gama creciente de disciplinas científicas y de ingeniería. Participamos en un esfuerzo —acaso el más vasto hasta la fecha— por alcanzar una síntesis del conocimiento científico. (Ackoff, 1959.)

De esta manera se cierra el círculo y volvemos a los avances de la sociedad tecnológica contemporánea de los cuales partimos. Lo que se deduce de estas consideraciones —por esbozadas y superficiales que sean— es que en las ciencias modernas y las nuevas conceptualizaciones de la vida hacen falta nuevas ideas y categorías, las cuales, de una u otra manera, giran en torno al concepto de «sistema». Para variar, citemos a un autor soviético:

> La elaboración de métodos específicos para la investigación de sistemas es una tendencia general del conocimiento científico de hoy, al igual que la ciencia del XIX se caracterizaba por la concentración primaria de la atención en la elaboración de formas y procesos elementales de la naturaleza. (Lewada, en Hahn, 1967, p. 185.)

Los peligros de semejante tendencia son evidentes, por desgracia, y han sido expuestos a menudo. Según el psicoterapeuta Ruesch (1967), al nuevo mundo cibernético no le importa la gente sino los «sistemas»; el hombre se vuelve reemplazable y gastable. Para los nuevos utopistas de la ingeniería de sistemas, por repetir una frase de Boguslaw (1965), precisamente es el «elemento humano» el componente inconfiable de sus creaciones. O bien se elimina del todo, sustituyéndolo por el *hardware* de computadoras, maquinaria autorregulada y así por el estilo, o bien hay que hacerlo tan

www.esnips.com/web/Scientia

confiable como se pueda: mecanizado, conformista, controlado y estandarizado. Dicho con términos algo más ásperos, en el Gran Sistema el hombre ha de ser —y en gran medida lo es ya— un retrasado mental que oprime botones, o un idiota informado —quiere decirse—: adiestrado en alguna especialidad limitada, pero por lo demás simple parte de la máquina. Esto concuerda con un bien conocido principio de sistemas, el de la mecanización progresiva; el individuo se convierte cada vez más en un engranaje dominado por unos pocos guías privilegiados, mediocres y chanchulleros, que persiguen sus intereses privados tras la cortina de humo de las ideologías (Sorokin, 1966, pp. 558*ss*).

Ya contemplemos la expansión positiva del conocimiento y el control benéfico del medio y la sociedad, ya veamos en el movimiento de los sistemas la llegada del *Mundo feliz* y de *1984*, el hecho es que esto merece estudio intenso, y con él tenemos que vernos.

En torno a la historia de la teoría de los sistemas

Hemos visto ya que en todos los campos principales —de la física subatómica a la historia— reina el consenso acerca de la oportunidad de una reorientación de la ciencia. Hay progresos de la tecnologia moderna paralelos a esta tendencia.

Por lo que alcanza a averiguarse, la idea de una «teoría general de los sistemas» fue primero introducida por el presente autor, antes de la cibernética, la ingeniería de sistemas y el surgimiento de campos afines. Más adelante quedará expuesto (pp. 92 *ss*) cómo se vio llevado a ello, pero en vista de discusiones recientes parece indicada cierta ampliación.

Como pasa con toda nueva idea, en la ciencia o donde sea, el concepto de sistemas tiene una larga historia. Si bien el término «sistema» como tal no mereció hincapié, la historia del concepto incluye muchos nombres ilustres. Como «filosofía natural» podemos remontarlo a Leibniz; a Nicolás de Cusa con su coincidencia de los opuestos; a la medicina mística de Paracelso; a la visión de la historia, de Vico e Ibn-Kaldun, como sucesión de entidades o «sistemas» culturales; a la dialéctica de Marx y Hegel —por mencionar unos cuantos nombres de una rica panoplia de pensadores. El conocedor literario podrá recordar *De ludo globi* (1463; cf. Bertalanffy, 1928b) de Nicolás de Cusa, y el *Glasperlenspiel*

www.esnips.com/web/Scientia

de Hermann Hesse: ambos ven el andar del mundo reflejado en un juego abstracto, agudamente planeado.

Hubo una que otra obra preliminar en el terreno de la teoría general de los sistemas. Las «*Gestalten* físicas» de Köhler (1924) apuntaban en esta dirección pero no encaraban el problema con generalidad plena y restringían el tratamiento a *Gestalten* en física (y a fenómenos biológicos y psicológicos presumiblemente interpretables sobre esta ba). En una publicación posterior (1927), Köhler planteó el postulado de una teoría de los sistemas encaminada a elaborar las propiedades más generales de los sistemas inorgánicos, en comparación con los orgánicos; hasta cierto punto, al encuentro de esta exigencia salió la teoría de los sistemas abiertos. La obra clásica de Lotka (1925) fue la que más cerca llegó del objetivo, y le debemos formulaciones fundamentales. La verdad es que Lotka se ocupó de un concepto general de los sistemas (sin restringirse, como Köhler a sistemas de la física). Como era estadístico, sin embargo, interesado en problemas de poblaciones más bien que en problemas biológicos de organismos individuales, Lotka —cosa algo rara— concibió las comunidades como sistemas, sin dejar de ver en el individuo una suma de células.

No obstante, la necesidad y factibilidad de un enfoque de sistemas no fue evidente hasta hace poco. Resultó por necesidad del hecho de que el esquema mecanicista de vías causales aislables y el tratamiento merista resultaban insuficientes para enfrentarse a problemas teóricos, especialmente en las ciencias biosociales, y a los problemas prácticos planteados por la tecnología moderna. Su factibilidad quedó en claro gracias a distintos adelantos —teóricos, epistemológicos, matemáticos, etc.— que, aunque aún entre balbuceos, lo volvieron progresivamente realizable.

A principios de la tercera década del siglo, quien esto escribe se sentía desconcertado ante vacíos evidentes en la investigación y la teoría biológicas. El enfoque mecanicista entonces imperante y que acaba de ser mencionado parecía desdeñar, si no es que negar activamente, lo que es, ni más ni menos, esencial en los fenómenos de la vida. El autor abogó por una concepción organísmica en biología que hiciera hincapié en la consideración del organismo como un todo o sistema y viese el objetivo principal de las ciencias biológicas en el descubrimiento de los principios de organización a sus diversos niveles. Los primeros enunciados del autor datan de 1925-26, y la filosofía del «mecanicismo orgánico» de Whitehead

www.esnips.com/web/Scientia

fue publicada en 1925. Las labores de Cannon sobre la homeostasia aparecieron en 1929 y 1932. La concepción organísmica tuvo un gran precursor en Claude Bernard, pero la obra de éste casi no fue conocida fuera de Francia, y aún hoy sigue esperando ser cabalmente apreciada (cf. Bernal, 1957, p. 960). La aparición simultánea de ideas similares, independientemente y en diferentes continentes, fue sintomática de una nueva tendencia que, sin embargo, requerirla tiempo para ser aceptada.

Lo que incita a estas observaciones es el hecho de que en años recientes han vuelto a insistir en la «biología organísmica» eminentes biólogos estadounidenses (Dubos, 1964, 1967; Dobzhansky, 1966; Commoner, 1961), sin citar, no obstante, las labores muy anteriores de quien esto escribe, por mucho que sean debidamente reconocidas en la bibliografía europea y de los países socialistas (p. ej. Ungerer, 1966; Blandino, 1960; Tribiño, 1946; Kanaev, 1966; Kamarýt, 1961, 1963; Bendmann, 1963, 1967; Afanasjew, 1962). Puede afirmarse de plano que discusiones recientes (p. ej. Nagel, 1961; Hempel, 1965; Beckner, 1959; Smith, 1966; Schaffner, 1967), aunque refiriéndose por supuesto a adelantos de la biología durante los últimos 40 años, no han agregado ningún nuevo punto de vista en comparación con el trabajo del presente autor.

En filosofía, la formación del autor siguió la tradición del neopositivismo del grupo de Moritz Schlick, posteriormente llamado Círculo de Viena. Pero, como tenía que ser, su interés en el misticismo alemán, el relativismo histórico de Spengler y la historia del arte, aunado a otras actitudes no ortodoxas, le impidió llegar a ser un buen positivista. Eran más fuertes sus lazos con el grupo berlinés de la Sociedad de Filosofía Empírica en los años veintitantos; allí descollaban el filósofo-físico Hans Reichenbach, el psicólogo A. Herzberg, el ingeniero Parseval (inventor del dirigible).

En conexión con trabajos experimentales acerca del metábolismo y el crecimiento, por una parte, y con un esfuerzo por concretar el programa organísmico, por otra, fue adelantada la teoría de los sistemas abiertos, fundada en el hecho bastante trivial de que el organismo resulta ser uno de ellos, si bien por aquel entonces no había teoría. La primera presentación, luego de uno que otro intento, figura en este volumen como capítulo v. De suerte que la biofísica parecía requerir una expansión de la teoría física acostumbrada, por el rumbo de la generalización de los principios

www.esnips.com/web/Scientia

cinéticos y de la teoría termodinámica, la cual más tarde sería conocida como termodinámica irreversible.

Quedó de manifiesto entonces otra generalización. En muchos fenómenos biológicos, pero también de las ciencias sociales y del comportamiento, resultan aplicables expresiones y modelos matemáticos. Evidentemente, no es cosa de las entidades de la física y la química, y en este sentido trascienden la física como paragón de «ciencia exacta». (Dicho sea de paso, el autor inició una serie, *Abhandlungen zur exakten Biologie*, para suceder a las *Abhandlungen zur theoretischen Biologie* de Schaxel, pero hubo que suspenderlas por la guerra.) La similitud estructural entre semejantes modelos y su isomorfismo en diferentes campos se tornaron ostensibles, y en el centro quedaron precisamente problemas de orden, organización, totalidad, teleología, etc., excluidos programáticamente de la ciencia mecanicista. Tal fue, la idea de la «teoría general de los sistemas».

Los tiempos no eran favorables. La biología era tenida por idéntica al trabajo de laboratorio, y el autor entró en un limbo al publicar su *Theoretische Biologie* (1932), otro campo que no hace mucho pasó a ser académicamente respetable. Hoy por hoy, cuando hay tantas revistas y publicaciones de esta disciplina y la elaboración de modelos se ha convertido en pasatiempo bien visto y generosamente patrocinado, no es fácil imaginar la resistencia a aquellas ideas. La afirmación del concepto de la teoría general de los sistemas, especialmente por el difunto profesor Otto Pötzl, psiquiatra de Viena bien conocido, ayudó al autor a superar sus inhibiciones y preparar un escrito (reproducido como capítulo III de este libro). Una vez más intervino el destino. El artículo (en la *Deutsche Zeitschrift für Philosophie)* fue leído en pruebas, pero el número que lo traía quedó destruido en la catástrofe de la última guerra. Pasada ésta, la teoría general de los sistemas fue presentada en conferencias (cf. Apéndice), ampliamente discutida con físicos (von Bertalanffy, 1948a) y en pláticas y coloquios (p. ej. von Bertalanffy *et al.*, 1951).

La propuesta de la teoría de los sistemas fue recibida con incredulidad, por fantástica o presuntuosa. O bien —decían— era *trivial*, por no ser los llamados isomorfismos sino meros ejemplos del hecho palmario de resultar aplicables las matemáticas a toda suerte de cosas, lo cual no llevaba a mayor «descubrimiento» que la aplicabilidad de $2 + 2 = 4$ a manzanas, dineros y galaxias por igual;

www.esnips.com/web/Scientia

o bien era *falsa* y *equívoca*, en vista de que analogías superficiales —como en la famosa comparación de la sociedad con un «organismo»— disimulan diferencias genuinas y conducen así a conclusiones erradas y hasta moralmente objetables. Para otros, en fin, era filosófica y metodológicamente *inválida* porque la pretendida «irreductibilidad» de niveles superiores a inferiores tendía a impedir una indagación analítica cuyo éxito era evidente en varios campos, como la reducción de la química a principios físicos, o de los fenómenos de la vida a la biología molecular.

Gradualmente fue viéndose que tales objeciones no atinaban con lo que representa la teoría de los sistemas: intentar la interpretación y la teoría científicas donde antes no había nada de ello, así como mayor generalidad que en las ciencias especiales. La teoría general de los sistemas respondía a una secreta tendencia en varias disciplinas. Una carta del economista K. Boulding, fechada en 1953, resumió bien la situación:

> He llegado casi casi a la misma conclusión que usted, aunque partiendo del rumbo de la economía y las ciencias sociales, y no de la biología: que hay un cuerpo de lo que vengo llamando «teoría empírica general», o «teoría general de los sistemas» —por usar su excelente terminología—, de amplia aplicabilidad a muy diversas disciplinas. Estoy seguro de que mucha gente en el mundo ha llegado a posiciones esencialmente iguales a la nuestra, pero están muy dispersos y no se conocen: así de difícil es cruzar los límites entre las disciplinas.

Durante el primer año del Center for Advanced Study in the Behavioral Sciences (Palo Alto), se encontraron Boulding, el biomatemático A. Rapoport, el fisiólogo Ralph Gerard y el presente autor. En la reunión anual de la American Association for the Advancement of Science de 1954 cuajó el proyecto de una sociedad dedicada a la teoría general de los sistemas. El nombre fue cambiado luego por el menos presuntuoso de Sociedad para la Investigación General de Sistemas, afiliada ahora a la AAAS y cuyas reuniones son muy concurridas en las convenciones de la AAAS. Fueron establecidos grupos locales de la Sociedad en varios centros, primero de Estados Unidos, luego de Europa. El programa original de la Sociedad no necesitó revisión:

> La Sociedad para la Investigación General de Sistemas fue organizada en 1954 para impulsar el desarrollo de sistemas teóri-

www.esnips.com/web/Scientia

cos aplicables a más de uno de los compartimientos tradicionales del conocimiento. Sus funciones principales son: *1*) investigar el isomorfismo de conceptos, leyes y modelos en varios campos, y fomentar provechosas transferencias de un campo a otro; *2*) estimular el desarrollo de modelos teóricos adecuados en los campos que carecen de ellos; *3*) minimizar la repetición de esfuerzo teórico en diferentes campos; *4*) promover la unidad de la ciencia mejorando la comunicación entre especialistas.

Los anuarios de la sociedad, *General Systems*, bajo la eficiente redacción de A. Rapoport, le han servido de órgano desde entonces. *General Systems*, intencionalmente, no sigue una política rígida sino que publica trabajos que difieren en intención, según parece convenir a un campo necesitado de ideas y exploración. Numerosas investigaciones y publicaciones sustanciaron la tendencia en varios campos; apareció una revista, *Mathematical Systems Theory*.

Mientras tanto hubo otro progreso. *Cybernetics* de Norbert Wiener apareció en 1948, como resultado de los adelantos entonces recientes en la tecnología de las computadoras, la teoría de la información y las máquinas autorreguladas. Otra vez se dio una coincidencia de las que se presentan cuando hay ideas en el aire: aparecieron casi al mismo tiempo tres contribuciones fundamentales, la *Cybernetics* de Wiener (1948), la teoría de la información de Shannon y Weaver (1949) y la teoría de los juegos de von Neumann y Morgenstern (1947). Wiener llevó los conceptos de cibernética, retroalimentación e información mucho más allá de los campos de la tecnología, y los generalizó en los dominios biológico y social. Es verdad que la cibernética no careció de precursores. El concepto de homeostasia debido a Cannon fue piedra angular en estas consideraciones. Menos conocidos modelos detallados de fenómenos fisiológicos con retroalimentación habían sido elaborados en la tercera década por el fisiólogo alemán Richard Wagner (1954), por el laureado Nobel suizo W. R. Hess (1941, 1942), y en el *Rafferenzprinzip* de von Holst. La enorme popularidad de la cibernética en la ciencia, la tecnología y la publicidad general se debe, ni que decir tiene, a Wiener, con su proclamación de la Segunda Revolución Industrial.

La estrecha correspondencia entre los dos movimientos queda de manifiesto en un enunciado programático de L. Frank, abriendo una conferencia de cibernética:

www.esnips.com/web/Scientia

Los conceptos de conducta intencional y de teleología se han asociado por largo tiempo a una misteriosa capacidad autoperfectiva o buscadora de metas, o causa final, ordinariamente de origen sobrehumano o sobrenatural. Para adelantar en el estudio de los aconteceres, el pensamiento científico tuvo que rechazar semejantes creencias en el propósito y en conceptos de operaciones teleológicas, en favor de una visión estrictamente mecanicista y determinista de la naturaleza. Esta concepción mecanicista quedó firmemente establecida con la demostración de que el universo se basaba en la operación de partículas anónimas que se movían al azar, de modo desordenado, generando, con su multiplicidad, orden y regularidad de naturaleza estadística, como en la física clásica y las leyes de los gases. El triunfo irrebatible de tales conceptos y métodos en física y astronomía, y luego en química, dio a la biología y la fisiología su orientación preponderante. Este enfoque de los problemas de los organismos fue reforzado por los afanes analíticos de la cultura y los lenguajes de la Europa occidental. Los supuestos básicos de nuestras tradiciones y las persistentes implicaciones del lenguaje que usamos, casi nos fuerzan a abordar todo lo que estudiamos como si estuviera compuesto de partes o factores separados, discretos, que debemos tratar de aislar e identificar como causas potentes. De ahí derivamos nuestra preocupación por el estudio de la relación entre dos variables. Somos hoy testigos de una búsqueda de nuevos enfoques, de conceptos nuevos y más amplios y de métodos capaces de vérselas con grandes conjuntos de organismos y personalidades. El concepto de mecanismo teleológico, sin importar cómo pueda ser expresado en términos diferentes, puede verse como un intento de escapar de estas viejas formulaciones mecanicistas que hoy resultan inadecuadas, y de presentar nuevas y fecundas concepciones y metodologías más efectivas para estudiar los procesos de autorregulación, los sistemas y organismos con autoorientación y las personalidades que se autodirigen. Así, expresiones como *retroalimentación, servomecanismos, sistemas circulares* y *procesos circulares* pueden ser tomadas como expresiones distintas pero en gran medida equivalentes de la misma concepción. (Frank *et al.*, 1948, condensado.)

Reseñar el desarrollo de la cibernética en la tecnología y la

www.esnips.com/web/Scientia

ciencia sería salir de los alcances de este libro, además de ser innecesario, en vista de la rica bibliografía de este campo. A pesar de ello este repaso histórico no deja de ser oportuno en vista de ciertas equivocaciones e interpretaciones erradas. Así, Buckley (1967, p. 36) afirma que «la moderna teoría de los sistemas, aunque surgida al parecer *de novo* a partir del esfuerzo de la última guerra, puede verse como culminación de un vasto cambio de punto de vista, que llevaba unos siglos tratando de imponerse». La segunda parte del enunciado es cierta, mas no la primera; la teoría de los sistemas no surgió «del esfuerzo de la última guerra» sino que se remonta a mucho más atrás y tiene raíces muy distintas del *hardware* militar y cuestiones tecnológicas afines. Tampoco hay «emergencia de la teoría de los sistemas a partir de recientes adelantos en el análisis de sistemas de ingeniería» (Shaw, 1965), excepto en un sentido especial de la palabra.

La teoría de los sistemas es también frecuentemente identificada con la cibernética y la teoría del control. Esto es asimismo incorrecto. La cibernética, como teoría de los mecanismos de control en la tecnología y la naturaleza, fundada en los conceptos de información y retroalimentación, no es sino parte de una teoría general de los sistemas; los sistemas cibernéticos son un caso especial —por importante que sea— de los sistemas que exhiben autorregulación.

Tendencias en la teoría de los sistemas

En tiempos en que cualquier novedad, por trivial que sea, es saludada llamándola revolucionaria, está uno harto de aplicar este rótulo a los adelantos científicos. En vista de que la minifalda y el cabello largo se designan como una revolución en la adolescencia, y cualquier nuevo modelo de automóvil o de potingue lanzado por la industria farmacéutica constituyen revoluciones también, la palabra es una muletilla publicitaria que no merece consideración seria. Puede, sin embargo, ser empleada en un sentido estrictamente técnico: las «revoluciones científicas» son identificables merced a ciertos criterios diagnósticos.

A la zaga de Kuhn (1962), una revolución científica es definida por la aparición de nuevos esquemas conceptuales o «paradigmas». Estos ponen en primer plano aspectos que anteriormente no eran vistos o percibidos, o por ventura ni suprimidos, en la ciencia «normal», es decir la ciencia aceptada y practicada generalmente en el tiempo en cuestión. Hay así un desplazamiento de la problemá-

www.esnips.com/web/Scientia

tica advertida e investigada y un cambio en las reglas de la práctica científica, comparable a la mutación de *Gestalten* perceptuales en experimentos psicológicos en que, p. ej., la misma figura puede ser vista como dos caras y una taza o como un pato y un conejo. Es comprensible que en tales fases críticas se haga hincapié en el análisis filosófico, no sentido como necesario en períodos de crecimiento de la ciencia «normal». Las primeras versiones de un nuevo paradigma suelen ser toscas, resuelven pocos problemas, y las soluciones que dan a éstos distan de ser perfectas. Hay profusión y competencia de teorías, limitada cada una con respecto al número de problemas que cubre y resuelve con elegancia. Sin embargo, el nuevo paradigma abarca nuevos problemas, especialmente los que antes eran rechazados por «metafísicos».

Kuhn dedujo estos criterios del estudio de las revoluciones «clásicas» en física y química, pero describen de maravilla los cambios acarreados por los conceptos organísmico y de sistemas; además de dilucidar sus méritos y limitaciones. Especialmente, y no hay que sorprenderse, la teoría de los sistemas comprende un conjunto de enfoques que difieren en estilo y propósito.

El problema de los sistemas es esencialmente el problema de las limitaciones de los procedimientos analíticos en la ciencia. Esto solía ser expresado en enunciados semimetafísicos, como el de la evolución emergente y lo de que «el todo es más que la suma de sus partes», pero tiene un sentido operacional claro. «Proceder analítico» quiere decir que una entidad investigada es resuelta en partes unidas, a partir de las cuales puede, por tanto, ser constituida o reconstituida, entendiéndose estos procederes en sus sentidos tanto material como conceptual. Es éste el principio básico de la ciencia «clásica», que puede circunscribirse de diferentes modos: resolución en encadenamientos causales aislables, búsqueda de unidades «atómicas» en los varios campos de la ciencia, etc. El progreso de la ciencia ha mostrado que estos principios clásicos, que Galileo y Descartes fueron los primeros en enunciar, tienen éxito espléndido en variadísimos campos de fenómenos.

La aplicación del procedimiento analítico depende de dos condiciones. La primera es que no existan interacciones entre «partes», o que sean tan débiles que puedan dejarse a un lado en ciertas investigaciones. Sólo con esta condición es posible «deslindar» las partes —real, lógica y matemáticamente— y luego volverlas a «juntar». La segunda condición es que las relaciones que describan

www.esnips.com/web/Scientia

el comportamiento de partes sean lineales; sólo entonces queda satisfecha la condición de aditividad, o sea que una ecuación que describa la conducta del total tiene la misma forma que las ecuaciones que describen la conducta de las partes; los procesos parciales pueden ser superpuestos para obtener el proceso total, etc.

Semejantes condiciones no las cumplen las entidades llamadas sistemas, o sea consistentes en partes «en interacción». El prototipo de su descripción es un conjunto de ecuaciones diferenciales simultáneas (pp. 56 *ss*), que son no lineales en el caso general. Puede ser circunscrito un sistema o «complejidad organizada» (p. 34) merced a la existencia de «interacciones fuertes» (Rapoport, 1966) o interacciones «no triviales» (Simon, 1965), es decir, no lineales. El problema metodológico de la teoría de los sistemas, pues, es vérselas con cuestiones que, comparadas con las analítico-aditivas de la ciencia clásica, son de naturaleza más general.

Como se ha dicho, hay varios enfoques para enfrentarse a tales problemas. Esto de los «enfoques» es intencionalmente vago, pues son lógicamente no homogéneos, representan distintos modelos conceptuales, técnicas matemáticas, puntos de vista generales, etc.; concuerdan, sin embargo, en ser «teorías de sistemas». Dejando aparte procederes de la investigación aplicada —así la ingeniería de sistemas, la investigación operacional, la programación lineal y no lineal, etc.—, los enfoques más importantes son éstos. (Para un buen resumen, cf. Drischel, 1968.)

La *teoría «clásica» de los sistemas* aplica matemáticas clásicas, o sea el cálculo infinitesimal. Aspira a enunciar principios aplicables a sistemas en general o a subclases definidas (p. ej. sistemas cerrados y abiertos), a proporcionar técnicas para su investigación y descripción, y aplicar éstas a casos concretos. En virtud de la generalidad de tal descripción, puede afirmarse que algunas propiedades formales serán aplicables a cualquier entidad *qua* sistema (o sistema abierto, o sistema jerárquico, etc.), aun cuando sus particulares naturaleza, partes, relaciones, etc. se desconozcan o no se investiguen. Hay entre los ejemplos principios generalizados de cinética aplicables, v. gr., a poblaciones de moléculas o entidades biológicas, o sea a sistemas químicos y ecológicos; la difusión, en las ecuaciones que la definen en fisicoquímica y en la difusión de rumores; la aplicación de modelos de estado uniforme o equilibrio dinámico (*steady state*) y de mecánica estadística al tráfico (Gazis, 1967); el análisis alométrico de sistemas biológicos y sociales.

www.esnips.com/web/Scientia

Computerización y simulación. Los conjuntos de ecuaciones diferenciales simultáneas como camino hacia un «modelo» o una definición de un sistema son fastidiosos de resolver, si son lineales, hasta en el caso de pocas variables; de no serlo, no pueden resolverse salvo en casos especiales (cuadro 1.1). Por esta razón las computadoras han abierto un nuevo camino en la investigación de sistemas; no sólo facilitando cálculos que de otra suerte habrían requerido tiempo y energía excesivos y reemplazando el ingenio matemático por procedimientos rutinarios, sino también abriendo campos donde no existen teorías o modos de solución matemáticos. Es posible así computerizar sistemas que van más allá de las matemáticas ordinarias; por otro lado, experimentos realmente realizados en

Cuadro 1.1

Clasificación de problemas matemáticos * y su facilidad de solución por métodos analíticos. (Según Franks, 1967.)

	Ecuaciones lineales			*Ecuaciones no lineales*		
Ecuación	Una ecuación	Varias ecuaciones	Muchas ecuaciones	Una ecuación	Varias ecuaciones	Muchas ecuaciones
Algebraica	Trivial	Fácil	Casi imposible	Muy difícil	Muy difícil	Imposible
Diferenciales ordinarias	Fácil	Difícil	Casi imposible	Muy difícil	Imposible	Imposible
Diferenciales parciales	Difícil	Casi imposible	Imposible	Imposible	Imposible	Imposible

* Cortesía de Electronic Associates, Inc.

el laboratorio pueden ser sustituidos por simulación en computadora, y el modelo alcanzado ser verificado entonces con datos experimentales. De esta forma, por ejemplo, calculó B. Hess la cadena glicolítica celular, de catorce pasos, en un modelo de más de 100 ecuaciones diferenciales no lineales. Análisis similares son cosa de rutina en economía, investigación de mercados, etc.

Teoría de los compartimientos. Un aspecto de los sistemas que

www.esnips.com/web/Scientia

puede ponerse aparte, en vista de la gran sutileza que alcanza dicho campo, es la teoría de los compartimientos (Rescigno y Segre, 1966): el sistema consiste en subunidades con ciertas condiciones de frontera, entre las cuales se dan procesos de transporte. Tales sistemas de compartimientos pueden tener, pongamos por caso, estructura «catenaria» o «mamilar» (cadena de compartimientos o compartimiento central en comunicación con múltiples periféricos). Es comprensible que las dificultades matemáticas se tornen prohibitivas en el caso de sistemas de tres o más componentes. El análisis resulta posible gracias a transformaciones de Laplace y a la introducción de la teoría de las redes y las gráficas.

Teoría de los conjuntos. Las propiedades formales generales de sistemas, sistemas cerrados y abiertos, etc. pueden ser axiomatizadas en términos de teoría de los conjuntos (Mesarovic, 1964; Maccia, 1966). En elegancia matemática este enfoque se compara favorablemente con las formulaciones más burdas y más especiales de la teoría «clásica» de los sistemas. Los nexos entre la teoría axiomatizada de los sistemas (o sus inicios actuales) y los problemas reales de sistemas son un tanto tenues.

Teoría de las gráficas. Muchos problemas de sistemas conciernen a sus propiedades estructurales o topológicas antes que a relaciones cuantitativas. Se dispone de más de un acceso al respecto. La teoría de las gráficas, en especial la de las gráficas dirigidas (digráficas), elabora estructuras relacionales representándolas en un espacio topológico. Ha sido aplicada a aspectos relacionales de la biología (Rashevsky, 1956, 1960; Rosen, 1960). Matemáticamente se vincula al álgebra de matrices; por el lado de los modelos, a la teoría de los sistemas por compartimientos son subsistemas parcialmente «permeables», y desde aquí a la teoría de los sistemas abiertos.

La *teoría de las redes*, a su vez, está ligada a las teorías de los conjuntos, las gráficas, los compartimientos, etc., y se aplica a sistemas tales como las redes nerviosas (p. ej. Rapoport, 1949-1950).

La *cibernética* es una teoría de los sistemas de control basada en la comunicación (transferencia de información) entre sistema y medio circundante, y dentro del sistema, y en el control (retroalimentación) del funcionamiento del sistema en consideración al medio. Según mencionamos y volveremos a discutir, el modelo tiene extensa aplicación pero no ha de identificarse con la «teoría de los sistemas» en general. En biología y otras ciencias básicas, el

www.esnips.com/web/Scientia

modelo cibernético conviene para describir la estructura formal de mecanismos de regulación, p. ej. mediante diagramas de bloques y de flujo. Así se logra reconocer la estructura reguladora aun cuando los genuinos mecanismos permanezcan desconocidos y sin describir, y el sistema sea una «caja negra» definida sólo por entrada y salida. Por razones parecidas, el mismo esquema cibernético puede aplicarse a sistemas hidráulicos, eléctricos, fisiológicos, etc. La compleja y sutil teoría de los servomecanismos en tecnología ha sido trasladada sólo en grado limitado a sistemas naturales (cf. Bayliss, 1966; Kalmus, 1966; Milsum, 1966).

La *teoría de la información*, en el sentido de Shannon y Weaver (1949), se basa en el concepto de información, definido por una expresión isomorfa con la entropía negativa de la termodinámica. De ahí la esperanza de que la información sirva de medida de la organización (cf. p. 42; Quastler, 1955). En tanto que la teoría de la información ganó importancia en ingeniería de comunicaciones, sus aplicaciones a la ciencia no han llegado a ser muy convincentes (E. N. Gilbert, 1966). La relación entre información y organización, teoría de la información y termodinámica, sigue siendo un problema decisivo (cf. pp. 157 *ss*).

La *teoría de los autómatas* (ver Minsky, 1967) es la teoría de autómatas abstractos con entrada, salida y posiblemente ensayo-y-error y aprendizaje. Un modelo general es la máquina de Turing (1936). Expresado en su manera más simple, un autómata de Turing es una máquina abstracta capaz de imprimir (o borrar) las marcas «1» y «0» en una cinta de longitud infinita. Es demostrable que cualquier proceso, de la complejidad que sea, puede ser simulado por una máquina, si este proceso es expresable mediante un número finito de operaciones lógicas. Todo lo que sea posible lógicamente (es decir, en un simbolismo algorítmico) también puede ser construido —en principio, aunque es claro que en modo alguno siempre en la práctica— por un autómata, o sea una máquina algorítmica.

La *teoría de los juegos* (von Neumann y Morgenstern, 1947) representa un enfoque diferente pero puede agregarse a las ciencias de sistemas por ocuparse del comportamiento de jugadores supuestamente «racionales» a fin de obtener ganancias máximas y pérdidas mínimas gracias a estrategias apropiadas contra el otro jugador (o la naturaleza). Tiene así que ver esencialmente con un «sistema» de «fuerzas» antagónicas con especificaciones.

www.esnips.com/web/Scientia

La *teoría de la decisión* es una teoría matemática que se ocupa de elecciones entre posibilidades.

La *teoría de las colas* se ocupa de la optimización de disposiciones en condiciones de apiñamiento.

No homogénea e incompleta como es, mezclando modelos (p. ej. sistema abierto, circuito de retroalimentación) con técnicas matemáticas (p. ej. las teorías de los conjuntos, las gráficas, los juegos), semejante enumeración ayuda a mostrar que hay una serie de enfoques para investigar sistemas, incluyendo poderosos métodos matemáticos. El punto que debe reiterarse es que problemas no considerados antes, no abordables, o tenidos por extracientíficos o puramente filosóficos, van siendo explorados progresivamente.

No hay ni que decir que a menudo existe incongruencia entre modelo y realidad. Hay modelos matemáticos muy complicados y rebuscados, pero no deja de ser dudoso cómo podrán aplicarse al caso concreto; existen problemas fundamentales para los cuales no disponemos de técnicas matemáticas. Ha habido desencanto de esperanzas excesivas. La cibernética, pongamos por caso, demostró su repercusión no sólo en la tecnología sino en ciencias básicas, al proporcionar modelos para fenómenos concretos y traer fenómenos teleológicos —antes tabú— al ámbito de los problemas cientlficamente legítimos; mas no ofreció una explicación totalizante o gran «visión del mundo», por ser extensión más que reemplazamiento del punto de vista mecanicista y de la teoría de las máquinas (cf. Bronowski, 1964). La teoría de la información, tan desarrollada matemáticamente, resultó un chasco en psicología y sociología. La teoría de los juegos fue aplicada esperanzadamente a la guerra y la política, pero no se nota que haya conducido a mejoramiento de las decisiones políticas y del estado del mundo, fracaso no inesperado cuando se considera cuán poco se parecen las potencias a los jugadores «racionales» de la teoría de los juegos. Conceptos y modelos de equilibrio, homeostasia, ajuste, etc. convienen para el mantenimiento de sistemas, pero son inadecuados para fenómenos de cambio, diferenciación, evolución, neguentropía, producción de estados improbables, creatividad, establecimiento de tensiones, autorrealización, emergencia, etc. Ya Cannon lo advirtió al reconocer, junto a la homeostasia, una «heterostasia» que incluía fenómenos de las otras naturalezas. La teoría de los sistemas abiertos se aplica a una vasta gama de fenómenos en biología (y tecnología), pero hay que prevenir contra su expansión incauta a campos para los

www.esnips.com/web/Scientia

cuales no son sus conceptos. Semejantes limitaciones y lagunas son de esperarse en un campo que apenas ha cumplido veinte o treinta años. En última instancia, el desencanto proviene de convertir lo que es un modelo útil hasta cierto punto en alguna realidad metafísica y en filosofía del «nada sino», como ha pasado tantas veces en la historia intelectual.

Las ventajas de los modelos matemáticos —no ambigüedad, posibilidad de deducción estricta, verificabilidad por datos observados— son bien conocidas. No quiere esto decir que modelos formulados en lenguaje ordinario hayan de ser desdeñados o rechazados.

Un *modelo verbal* es preferible a ninguno o a un modelo que, por poder ser formulado matemáticamente, es impuesto por la fuerza a la realidad y la falsifica. Teorías enormemente influyentes, como el psicoanálisis, no fueron matemáticas, o, como la teoría de la selección, su influencia llegó mucho más lejos que las construcciones matemáticas que no surgieron hasta después y cubren sólo aspectos parciales y una fracción pequeña de datos empíricos.

Las matemáticas significan esencialmente la existencia de un algoritmo mucho más preciso que el del lenguaje ordinario. La historia de la ciencia atestigua que la expresión en lenguaje ordinario a menudo precedió a la formulación matemática, a la invención de un algoritmo. Acuden en seguida ejemplos a las mientes: el paso de contar en palabras a los números romanos (semialgoritmo semiverbal y basto) y a la notación arábiga con valor posicional; ecuaciones, desde la formulación verbal hasta el rudimentario simbolismo manejado con virtuosismo (aunque para nosotros difícil de seguir) por Diofanto y otros fundadores del álgebra, y de ahí a la notación moderna; teorías como las de Darwin o de la economía, que no hallaron hasta más tarde formulación matemática (parcial). Quizá valga más tener primero algún modelo no matemático, con sus limitaciones, pero que exprese algún aspecto previamente inadvertido, en espera del surgimiento venidero de algún algoritmo apropiado, que partir de modelos matemáticos prematuros que calquen algoritmos conocidos y con ello acaso restrinjan el campo visual. Muchos adelantos en biología molecular, teoría de la selección, cibernética y otros campos exhibieron los efectos cegadores de lo que Kuhn llama ciencia «normal» —esquemas conceptuales monolíticamente aceptados.

Así los modelos en lenguaje ordinario tienen su sitio en la teoría de los sistemas. La idea de sistema conserva su valor incluso

www.esnips.com/web/Scientia

donde no puede ser formulada matemáticamente, o no deja de ser una «idea guía» en vez de ser construcción matemática. Por ejemplo, podemos carecer de conceptos de sistema satisfactorios en sociología, pero la simple apreciación de que las entidades sociales son sistemas y no sumas de átomos sociales, o de que la historia consiste en sistemas (por mal definidos que estén) llamados civilizaciones y que obedecen a principios generales de los sistemas, implica una reorientación en los campos aludidos.

Tal como puede verse por el repaso anterior, dentro del «enfoque de sistemas» hay tendencias y modelos mecanicistas y organísmicos que tratan de dominar los sistemas ora por «análisis», «causalidad lineal» (incluyendo la circular), «autómatas», ora merced a «totalidad», «interacción», «dinámica» (o las palabras que se usen para circunscribir la diferencia). En tanto que estos modelos no se excluyen mutuamente y aun el mismo fenómeno sea abordable mediante diferentes modelos (conceptos «cibernéticos» o «cinéticos», p. ej.; cf. Locker, 1964), puede preguntarse qué punto de vista será el más general y fundamental. A grandes rasgos, es ésta una pregunta que hacer a la máquina de Turing como autómata general.

Una consideración oportuna (y no tratada, que sepamos, en la teoría de los autómatas) es el problema de los números «inmensos». El enunciado fundamental de la teoría de los autómatas es que los aconteceres que pueden definirse con un número finito de «palabras» son realizables por un autómata (p. ej. una red neural formal según McCulloch y Pitts, o una máquina de Turing) (von Neumann, 1951). La cuestión reside en el calificativo de «finito». El autómata puede, por definición, realizar una serie finita de acontecimientos (por larga que sea), pero no una infinita. Pero ¿y cuándo el número de pasos requerido es «inmenso», o sea no infinito pero superior, p. ej., al número de partículas del universo (estimado del orden de 10^{80}), o al de acontecimientos posibles en el alcance temporal del universo o alguna de sus subunidades (según la propuesta de Elsasser, 1966, un número cuyo logaritmo es un número grande)? Tales números inmensos aparecen en muchos problemas de sistemas con exponenciales, factoriales y otras funciones explosivamente crecientes. Surgen incluso en sistemas con número moderado de componentes que interactúen con fuerza (en grado no desdeñable) (cf. Ashby, 1964). Para «delinearlos» en una máquina de Turing haría falta una cinta de longitud «inmensa»: que excediera no sólo a las limitaciones prácticas sino a las físicas.

www.esnips.com/web/Scientia

Considérese, como ejemplo sencillo, una gráfica dirigida de N puntos (Rapoport, 1959b). Entre cada par puede existir o no existir una flecha (dos posibilidades). Hay así $2^{N(N-1)}$ diferentes modos de conectar N puntos. Si N es sólo 5, hay más de un millón de maneras de conectar los puntos. Con $N = 20$, el número de modos es superior al que se estima que hay de átomos en el universo. Problemas similares surgen, p. ej., con las conexiones posibles entre neuronas (número estimado del orden de 10 000 millones en el cerebro humano) y con el código genético (Repge, 1962). En el código (o clave) hay un mínimo de 20 (en verdad hay 64) «palabras» (tripletes de nucleótidos) que codifican los 20 aminoácidos; el código llega a contener algunos millones de unidades. Esto da $20^{1\,000\,000}$ posibilidades. Imagínese que el espíritu laplaciano tuviera que hallar el valor funcional de cada combinación: habría que hacer otras tantas pruebas, pero sólo hay 10^{80} átomos y organismos en el universo. Supongamos (Repge, 1962) que en la Tierra hay presentes 10^{30} células en un momento determinado. Imaginando además una nueva generación celular cada minuto, con una edad del planeta de 15 000 millones de años (10^{16} minutos) habría 10^{46} células en total. Para obtener sin falta un número máximo, hagamos intervenir 10^{20} planetas portadores de vida. Con ello, en todo el universo no habría, de fijo, más de 10^{66} seres vivos —número grande pero lejos de ser «inmenso». Pueden hacerse estimaciones con diferentes supuestos (p. ej. número de proteínas o enzimas posibles), pero los resultados son a fin de cuentas los mismos.

Por otra parte, según Hart (1959) la invención humana puede ser concebida como nuevas combinaciones de elementos previamente existentes. De ser así, la oportunidad de nuevas invenciones aumentará más o menos en función del número de posibles permutaciones y combinaciones de elementos disponibles, lo cual quiere decir que su aumento será un factorial del número de elementos. Ahora, el ritmo de aceleración del cambio social se acelera a su vez, de suerte que en muchos casos no se dará en el cambio cultural una aceleración logarítmica sino *log-log*. Hart presenta interesantes curvas que muestran cómo incrementos en velocidad humana, en áreas de mortandad por armas, en expectativas de vida, etc., siguen de hecho semejante expresión: el ritmo de crecimiento cultural no es exponencial o de interés compuesto, sino superaceleración según una curva *log-log*. De manera general, aparecerán límites

www.esnips.com/web/Scientia

a los autómatas si la regulación en un sistema no va dirigida contra una perturbación o una cantidad limitada de éstas, sino contra perturbaciones «arbitrarias», número indefinido de situaciones que no pudieran haber sido «previstas»; esto sucede mucho en la regulación embrionaria (p. ej. los experimentos de Driesch) y neural (p. ej. los experimentos de Lashley). Aquí la regulación resulta de la interacción entre muchos componentes (cf. la discusión de Jeffries, 1951, pp. 32*ss*). Esto, como reconoció el propio von Neumann, se diría vinculado a las tendencias «autorrestauradoras» de los sistemas organísmicos, en contraste con los tecnológicos; expresado en términos más modernos, vinculado a su naturaleza de sistemas abiertos, no prevista ni aun en el modelo abstracto de autómata que es la máquina de Turing.

Resulta, pues, que —según vitalistas como Driesch subrayaron hace mucho— la concepción mecanicista, inclusive tomada en la forma moderna y generalizada de un autómata de Turing, se desploma a fuerza de regulaciones después de perturbaciones «arbitrarias», y algo parecido acontece cuando el caso requiere un número de pasos «inmenso» en el sentido indicado. Aparecen problemas de realizabilidad, aun aparte de las paradojas inherentes a los conjuntos infinitos.

Las consideraciones anteriores incumben en particular a un concepto o complejo de conceptos que es de indubitable importancia para la teoría general de los sistemas: el de *orden jerárquico*. Hoy en día «vemos» el universo como una tremenda jerarquía, de las partículas elementales a los núcleos atómicos, átomos, moléculas, compuestos de molécula compleja, hasta la pléyade de estructuras (microscopia electrónica y óptica) que caen entre las moléculas y las células (Weiss, 1962b), luego células organismos y, más allá, organizaciones supraindividuales. Un esquema atractivo (aunque no el único) del orden jerárquico se debe a Boulding (cuadro 1.2.). Una jerarquía parecida surge tanto en «estructuras» como en «funciones». En última instancia, estructura (orden de partes) y función (orden de procesos) pudieran ser la mismísima cosa: en el mundo físico la materia se disuelve en un juego de energías, y en el mundo biológico las estructuras son expresión de una corriente de procesos. Actualmente, el sistema de las leyes físicas trata sobre todo del ámbito que hay entre átomos y moléculas (y su suma en la macrofísica), el cual evidentemente es una tajada de un espectro mucho más amplio. Las leyes y fuerzas de la organiza-

www.esnips.com/web/Scientia

ción se conocen insuficientemente en los dominios subatómico y supermolecular. Hay accesos tanto al mundo subatómico (física de las altas energías) como al supermolecular (física de los compuestos de grandes moléculas), pero está claro que esto no es más que el principio. Resalta, por un lado, en la presente confusión de partículas elementales; por otro, en la actual carencia de comprensión física de las estructuras vistas al microscopio electrónico y en la ausencia de una «gramática» del código genético (cf. p. 159).

Es evidente que una teoría general del orden jerárquico será un pilar de la teoría general de los sistemas. Es posible enunciar principios de orden jerárquico en lenguaje verbal (Koestler, 1967; en prensa); hay ideas semimatemáticas (Simon, 1965) conectadas con la teoría de las matrices, y formulaciones en términos de lógica matemática (Woodger, 1930-31). En la teoría de las gráficas el orden jerárquico es expresado por el «árbol» y de esta manera llegan a ser representados aspectos relacionales de jerarquías. Pero el problema es mucho más amplio y hondo: la cuestión del orden jerárquico está íntimamente ligada a las de la diferenciación, la evolución y la medición de la organización, que no parecen expresadas como es debido ni en términos de energética (entropía negativa) ni de teoría de la información (*bits*) (cf. pp. 156 *ss*). A fin de cuentas, según se mencionó, el orden jerárquico y la dinámica pudieran ser lo mismo, como expuso Koestler tan bien en su símil de «The Tree and the Candle».

Hay, de este modo, una serie de modelos de sistemas, más o menos adelantados y complicados. Algunos conceptos, modelos y principios de la teoría general de los sistemas —como el orden jerárquico, la diferenciación progresiva, la retroalimentación, las características de sistemas definidas por las teorías de los conjuntos y las gráficas, etc.— son aplicables a grandes rasgos a sistemas materiales, psicológicos y socioculturales; otros, como el de sistema abierto definido por el intercambio de materia, se restringen a ciertas subclases. La práctica del análisis aplicado de sistemas muestra que habrá que aplicar diversos modelos, de acuerdo con la naturaleza del caso y con criterios operacionales.

www.esnips.com/web/Scientia

Cuadro 1.2
Catálogo informal de niveles principales en la jerarquía de los sistemas. (Basado parcialmente en Boulding, 1956b.)

Nivel	Descripción y ejemplos	Teoría y modelos
Estructuras estáticas	Átomos, moléculas, cristales, estructuras biológicas, del nivel microscópico electrónico al macroscópico	P. ej. fórmulas estructurales de la química; cristalografía; descripciones anatómicas
Relojería	Relojes, máquinas ordinarias en general; sistemas solares	Física ordinaria, tal como las leyes de la mecánica (newtoniana y einsteiniana) y otras
Mecanismos de control	Termostato, servomecanismos, mecanismo homeostático en los organismos	Cibernética; retroalimentación y teoría de la información
Sistemas abiertos	Llamas, células y organismos en general	(a) Expansión de la teoría física a sistemas que sostienen paso de materia (metabolismo) (b) Almacenamiento de información en el código genético (DNA) Hoy por hoy no está claro el vínculo entre (a) y (b)
Organismos inferiores	Organismos «vegetaloides»: diferenciación creciente del sistema (la llamada «división del trabajo» en el organismo); distinción entre reproducción e individuo funcional («línea germinal y soma»)	Casi no hay teoría ni modelos
Animales	Importancia creciente del tráfico en la información (evolución de receptores, sistemas nerviosos); aprendizaje; comienzos de consciencia	Comienzos en la teoría de los autómatas (relaciones S-R), retroalimentación (fenómenos regulatorios), comportamiento autónomo (oscilaciones de relajamiento), etc.
Hombre	Simbolismo; pasado y porvenir, yo y mundo, consciencia de sí, etc., como consecuencias; comunicación por lenguaje, etc.	Incipiente teoría del simbolismo

www.esnips.com/web/Scientia

Cuadro 1-2 (continuación)

Nivel	Descripción y ejemplos	Teoría y modelos
Sistemas socioculturales	Poblaciones de organismos (incluyendo los humanos); comunidades determinadas por símbolos (culturas)	Leyes estadísticas y posiblemente dinámicas en dinámica de poblaciones, sociología, economía, posiblemente historia Comienzos de una teoría de los sistemas culturales
Sistemas simbólicos	Lenguaje, lógica, matemáticas, ciencias, artes, moral, etc.	Algoritmos de símbolos (p. ej. matemáticas, gramática); «reglas del juego» como en artes visuales, música, etc.

Nota: Este repaso es impresionista e intuitivo y no aspira al rigor lógico. Por regla general, los niveles superiores presuponen los inferiores (p. ej. los fenómenos de la vida presuponen los del nivel fisicoquímico, los fenómenos socioculturales el nivel de la actividad humana, etc.), pero la relación entre niveles requiere aclaración en cada caso (cf. problemas como el del sistema abierto y el código genético como aparentes requisitos previos para la «vida», la relación entre sistemas «conceptuales» y «reales», etc.). En este sentido, la lista insinúa tanto los límites del reduccionismo como los vacíos en el conocimiento actual.